DOI: 10.22067/jfcei.2022.71939.1053

اثر کیفیت شیمیایی مایعات منفذی مختلف بر ارتباط مکش با پتانسیل تورمی یک خاک متورم‌شونده*

سهراب خضریان[۱] علی رئیسی استبرق[۲] محدثه امینی[۳] جمال عبدالهی علی‌بیک[۴]

چکیده *در این کار تحقیقاتی، ارتباط مکش ماتریک با پتانسیل تورمی و فشار تورمی یک خاک متورم‌شونده تهیه‌شده با مایعات منفذی مختلف (آب مقطر، سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید) با انجام آزمایش‌های لازم، مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه‌هایی از خاک متورم‌شونده که حاوی مایع منفذی آب مقطر و محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید با غلظت g/l ۲۵۰ بودند، به‌روش تراکم استاتیکی تهیه شدند و منحنی مشخصه آب و خاک با استفاده از روش فیلتر کاغذی برای هر یک از آن‌ها تعیین شد. با انجام آزمایش‌های مربوط، میزان تورم آزاد و فشار تورمی در رطوبت‌های مختلف برای هر نمونه به‌دست آمد. هم‌چنین با استفاده از منحنی مشخصه هر نمونه برای هر رطوبت، مکش معادل آن به‌دست آمد. سپس منحنی تغییرات مقادیر تورم و فشار تورمی با مکش تعیین گردید. نتایج نشان داد که کیفیت‌های گوناگون مایع منفذی سبب ایجاد منحنی‌های مشخصه آب و خاک مختلف می‌گردد. از طرفی مقایسه نتایج مشخص نمود که در هر مکش مشخص، پتانسیل تورمی و فشار تورمی نمونه‌های با مایع منفذی سدیم‌کلرید بیشتر از سایر مایعات منفذی می‌باشد. علاوه بر این نتایج SEM نشان داد که ساختار خاک برای مایعات منفذی مختلف یکسان نمی‌باشد و برای یک مایع منفذی مشخص نیز، ساختار خاک در ابتدا و انتهای آزمایش متفاوت است.*

واژه های کلیدی: خاک متورم‌شونده، تورم آزاد، منحنی مشخصه، سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید.

مقدمه

خاک‌های متورم‌شونده از گروه خاک‌های مشکل‌آفرین محسوب می‌گردند و در اکثر نقاط جهان به‌خصوص در نواحی خشک و نیمه‌خشک به‌وفور یافت می‌شوند. حجم این خاک‌ها در اثر تغییر رطوبت، تغییر قابل ملاحظه‌ای می‌کند و این امر موجب بروز خساراتی در رابطه با سازه‌های احداث شده بر روی آن‌ها می‌گردد. بنابراین خسارات ناشی از رفتار آن‌ها که به سازه‌های ساخته‌شده وارد شده‌است، بسیار قابل توجه می‌باشد. متوسط خسارات ناشی از این خاک‌ها به جاده‌ها، ساختمان‌ها، کانال‌های آبیاری و... حدود ۹ میلیارد دلار در سال برآورد شده‌است که حدود دو برابر هزینه خسارات ناشی از بلایای طبیعی مانند سیل و زلزله می‌باشد[1]. پوپالا و سراتو [2] در سال ۲۰۰۹، گزارش کردند که متوسط خسارات ناشی از خاک‌های متورم‌شونده در ایالات متحده آمریکا سالانه حدود ۱۳ میلیارد دلار است که یک–سوم این خسارات در ساختمان‌های مسکونی و تجاری روی می‌دهد. اتحادیه بیمه‌گران انگلستان [3] نیز اعلام کردند که هزینه متوسط ناشی از خسارات رفتار این خاک‌ها در واحدهای ساختمانی از ۴۰۰ میلیون پوند در سال تجاوز می‌کند. هم‌چنین ریچاردز[4] در سال ۱۹۹۰ و مک‌منوس و همکاران [5] در سال ۲۰۰۴، از بررسی‌های خود نتیجه گرفتند که خسارات ناشی از رفتار این خاک‌ها در ارتباط با ساختمان‌های مسکونی، خطوط لوله و نیز سایر ساختمان‌ها در استرالیا، سالانه حدود میلیاردها دلار می‌باشد. بنابراین شناخت کافی از خواص این خاک‌ها موجب افزایش ضریب اطمینان و ایمنی سازه‌های احداث شده بر روی آن‌ها و در نتیجه استفاده بیشتر از آن‌ها در ساخت پروژه‌های عمرانی می‌شود. عوامل اولیه حاکم بر رفتار این خاک ها شامل نوع کانی‌های خاک رسی، شرایط رطوبتی خاک، میزان فشار سربار و نیز مواد غیرمتورم‌شونده می‌باشد. محققانی مانند چن و همکاران [6] و الیعقوب و همکاران [7] بیان کردند که علاوه بر عوامل یاد شده، عواملی مانند ساختمان خاک، عمل متقابل ذرات خاک با یکدیگر و تاریخچه تنش نیز بر پتانسیل تورمی این خاک‌ها اثرگذار می‌باشد. محققینی مانند صدیقا و

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۵/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۱/۷ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران
Email: sohrabkhezry@yahoo.com
(۲) استاد، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.
(۳) دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.
(٤) مربی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

همکاران[8]، کاستلانس و همکاران [9] و استبرق و همکاران [10] با انجام آزمایش‌های مختلف به این نتیجه دست یافتند که پتانسیل تورمی این خاک‌ها نه‌تنها به رطوبت، چگالی اولیه و سربار اعمال شده بر آن‌ها بستگی دارد، بلکه کیفیت شیمیایی مایع منفذی و مایع مستغرق‌کننده نیز از عوامل مؤثر می‌باشد. پژوهشگرانی مانند پوش[11]، دی مایو و همکاران [12]، رائو و شیواناندا [13] و صدیقا و همکاران [14] از نتایج آزمایش‌های خود بر روی نمونه‌هایی از خاک متورم‌شونده با کیفیت شیمیایی مایعات منفذی مختلف (محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید) نتیجه گرفتند که کیفیت مایع منفذی بر میزان پتانسیل تورمی آن‌ها، نقش مهمی را ایفا می‌کند.

به‌طور کلی این خاک‌ها با افزایش و کاهش رطوبت، دچار تغییر حجم می‌گردند که معمولاً سازوکار تورم در مورد آن‌ها بسیار پیچیده‌تر از انقباض می‌باشد. لرد [14] بیان کرد که پدیده تورم تحت اثر عواملی مانند تبلور، پخشیدگی لایه مضاعف و وضعیت براونی ذرات نسبت‌به یکدیگر رخ می‌دهد. خاک‌های متورم‌شونده معمولاً در حالت غیراشباع هستند، به‌عبارت دیگر در آن‌ها مکش ماتریک و اسمزی وجود دارد که تغییرات مکش ماتریک در تغییر پتانسیل تورمی و فشار تورمی بسیار مؤثر می‌باشد. مکش ماتریک به تغییرات رطوبت و درجه اشباع خاک بستگی دارد به‌طوری که افزایش آن‌ها موجب کاهش مکش ماتریک و افزایش پتانسیل تورمی و فشار تورمی می‌گردد. بنابراین مکش ماتریک نقش بسیار مهمی در رفتار این خاک‌ها ایفا می‌کند. زمانی که مایع مستغرق‌کننده و مایع منفذی دارای کیفیت یکسانی نباشد، مکش اسمزی عاملی تأثیرگذار در رفتار خاک‌های متورم‌شونده می‌باشد. جانگ و همکاران [15] در سال ۲۰۱۹، آزمایش‌های مختلف تورمی را روی نمونه‌هایی از خاک متورم‌شونده از نوع بنتونیت که با آب مقطر و یا محلول سدیم‌کلرید با غلظت‌های مختلف مستغرق شده بود، انجام دادند. سپس آن‌ها فشار تورمی را برای این نمونه‌ها با استفاده از روش کوئی و همکاران [16]، تورم–حکیم (Swell-Consolidation) و حجم ثابت (Constant Volume) تعیین کردند. آن‌ها از مقایسه نتایج به‌دست‌آمده اعلام کردند که در روش تورم–حکیم، فشار تورمی به‌دست‌آمده بیشتر از روش‌های دیگر می‌باشد. هی و همکاران [17] نیز در سال ۲۰۲۰ مطالعاتی در خصوص تورم و انقباض بنتونیت با انجام آزمایش‌هایی با استفاده از مایع مستغرق‌کننده آب مقطر و آب حاوی سدیم‌کلرید با غلظت‌های مختلف و نیز در مکش‌های گوناگون در دستگاه تحکیم معمولی انجام دادند. آن‌ها بیان کردند که درصد تورم با افزایش غلظت سدیم‌کلرید، کاهش می‌یابد و در هنگام انقباض با افزایش مکش، چگالی (دانسیته) نمونه هم افزایش می‌یابد. آن‌ها هم‌چنین از اطلاعات به‌دست‌آمده نتیجه‌گیری کردند که در یک مکش ثابت، درجه اشباع نمونه مستغرق‌شده با محلول سدیم‌کلرید، بیشتر از نمونه مستغرق‌شده با آب مقطر است. هم‌چنین لیانگ و همکاران [18] در سال ۲۰۲۱، با انجام آزمایش‌های متعدد روی نمونه‌هایی از یک خاک متورم‌شونده با چگالی‌های مختلف، با ایجاد مکش به‌روش اسمزی و تعیین چگونگی توزیع مایع منفذی در نمونه به‌وسیله طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته‌ای (NRM) اعلام کردند که روند افزایش فشار تورمی با کاهش مکش، غیریکنواخت می‌باشد. آن‌ها این پدیده را به شرایط توزیع مایع منفذی در توده خاک مرتبط دانستند. سان و همکاران[19] در سال ۲۰۲۲ مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای روی خواص تورمی نمونه‌هایی از یک خاک بنتونیت که قرار بود به‌عنوان پوشش و محافظ زباله‌های هسته‌ای مدفون مورد استفاده قرار گیرد، انجام دادند که در این مطالعه اثر چگالی خشک اولیه، سربار و کیفیت شیمیایی مایع مستغرق‌کننده، مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها فشار تورمی را به‌روش‌های گوناگون، تورم–تحکیم و حجم ثابت نمونه‌ها تعیین نمودند. سپس روابطی تجربی برای تعیین فشار تورمی و هم‌چنین روابط بین سربار و چگالی خشک، ارائه نمودند. فربر و همکاران [20] نیز تغییرات پتانسیل تورمی و فشار تورمی را با تغییرات رطوبت، برای یک خاک متورم‌شونده که با آب معمولی مستغرق گردید را مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که مقدار تورم به مقدار رطوبت جذب شده اولیه توسط نمونه بستگی دارد. آن‌ها در کار تحقیقاتی خود از مایعات مستغرق‌کننده مختلف استفاده نمودند، لیکن از منحنی مشخصه آب و خاک (SWCC) استفاده نکردند. بررسی منابع نشان می‌دهد که گرچه در سال‌های اخیر مطالعاتی در مورد خواص تورمی خاک‌های متورم‌شونده صورت گرفته‌است، لیکن تاکنون پژوهشی در زمینه تعیین پتانسیل تورمی و فشار تورمی آن‌ها در مکش‌های مختلف صورت نپذیرفته‌است.

ضرورت تحقیق

خاک‌های رسی متورم‌شونده می‌بایست قبل از احداث سازه و ابنیه مورد نظر بر روی آن‌ها و یا استفاده از آنها به‌عنوان مصالح و منابع قرضه (در صورت عدم وجود خاک مناسب) به‌منظور اجرای پروژه‌های عمرانی، به‌سازی شوند تا خسارات ناشی از تغییر حجم ایجاد شده در آن‌ها بر اثر تغییر رطوبت به حداقل برسد. به‌سازی این خاک‌ها باید به‌گونه‌ای صورت پذیرد که اقتصادی بودن و تأمین ایمنی سازه احداث شده بر روی آن‌ها و یا پروژه ساخته شده با استفاده از آن‌ها، تأمین گردد. معمولاً به‌سازی این خاک‌ها بر اساس پتانسیل تورمی و فشار تورمی حداکثر (مکش صفر) صورت می‌پذیرد. لیکن ممکن است در مدت زمان در نظر گرفته‌شده برای عمر مفید پروژه مورد نظر، مکش این خاک‌ها صفر نگردد، به‌عبارت دیگر پتانسیل تورمی حداکثر (مکش صفر) در آن‌ها رخ ندهد. از طرف دیگر، یکی از کاربردهای بسیار مهم این خاک‌ها در محافظت از سرایت یا نشت مواد باطله و زباله‌های صنعتی و شهری در محیط‌زیست می‌باشد. بنابراین کیفیت مایع مستغرق‌کننده و هم‌چنین مایع منفذی نقش مهمی در عملکرد و خواص این خاک‌ها به‌منظور حفاظت از محیط‌زیست، به‌عهده دارند. بنابراین هدف از این پژوهش، انجام آزمایش‌های تورمی لازم روی نمونه خاک‌های متورم‌شونده با سه کیفیت مایع منفذی (آب مقطر، محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید با غلظت ۲۵۰ گرم بر لیتر) و تعیین پتانسیل تورمی و فشار تورمی آن‌ها در مکش‌های مختلف، مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با یکدیگر و ارائه نتایج به‌گونه‌ای است که بر اساس هر مکش بتوان میزان پتانسیل و فشار تورمی مربوطه برای مایع منفذی مورد نظر را به‌دست آورد و بر اساس آن‌ها اقتصادی‌ترین روش به‌سازی را برای آن‌ها توصیه کرد. در این مطالعه ابتدا منحنی مشخصه آب و خاک برای نمونه‌های مختلف که با مایعات مذکور تهیه شده بودند، تعیین گردید. سپس آزمایش‌های اصلی (پتانسیل تورمی و فشار تورمی) بر اساس استاندارد ASTM صورت پذیرفت و نتایج به‌دست‌آمده با یکدیگر مقایسه گردید و در خصوص آن‌ها بحث صورت پذیرفت. هم‌چنین برای بررسی ریز ساختار خاک به‌وجودآمده تحت تأثیر مایع منفذی با کیفیت‌های شیمیایی مختلف، اقدام به تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نمونه‌های خاک در دو حالت قبل و بعد از انجام آزمایش تورم آزاد شد و سپس نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه و بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده در این پژوهش شامل خاک، آب مقطر، محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید بوده‌است که در ادامه در مورد هر یک به‌طور خلاصه مطالبی ارائه می‌شود.

خاک. خاک رسی مورد استفاده در این پژوهش از اطراف قزوین تهیه شده که بر اساس طبقه‌بندی مک‌کین [۲۱] نوعی رس با قابلیت تورم‌پذیری متوسط می‌باشد. به‌منظور تهیه خاک متورم‌شونده با پتانسیل تورمی زیاد برای انجام آزمایش‌ها، اقدام به تهیه مخلوطی از خاک رس و بنتونیت با نسبت وزنی ۸۰٪ (رس) و ۲۰٪ (بنتونیت) گردید که این مخلوط مطابق با طبقه‌بندی مک‌کین، دارای قدرت تورمی زیاد می‌باشد. از این پس به این مخلوط به‌اختصار خاک گفته می‌شود. دلیل استفاده از خاک مصنوعی در این پژوهش این است که نمونه خاک‌هایی که در پروژه‌های تحقیقاتی و آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند، بایستی یک‌نواخت و تکرارپذیر باشند تا در هم‌گرایی تجزیه و تحلیل نتایج مشکلی به‌وجود نیاید، لیکن این خاصیت در خاک‌های طبیعی معمولاً وجود ندارد. از طرف دیگر، مدت زمان انجام آزمایش از فاکتورهای بسیار مهمی است که در برنامه‌ریزی (اقتصادی) پژوهش‌های آزمایشگاهی نقش مهمی ایفا می‌کند. خاک بنتونیت گرچه دارای پتانسیل تورمی بسیار زیادی است، لیکن زمان رسیدن آن به شرایط تعادل طولانی است. بنابراین با توجه به موارد مذکور، مخلوط بنتونیت و خاک رس موجود (با تورم بسیار کم) انتخاب گردید و مخلوط‌های مختلف با درصدهای گوناگون از آن‌ها تهیه و آزمایش تورم آزاد روی آن‌ها انجام شد. سپس میزان پتانسیل تورمی آن‌ها تعیین گردید و مخلوطی که بیشترین تورم را بر اساس معیار مک‌کین دارا بود، به‌عنوان خاک متورم‌شونده به‌منظور انجام آزمایش‌ها انتخاب گردید. روش انتخاب خاک متورم‌شونده در این کار مشابه روش به‌کار برده‌شده توسط پژوهشگرانی مانند آلنسو و همکاران [۲۲] و نوآموز و مسروری [۲۳] می‌باشد. از مهم‌ترین کاربردهای خاک مصنوعی می‌توان به ایجاد مأمن و جایگاه مناسب برای انباشتن و دفن زباله‌های صنعتی و شهری اشاره کرد. در واقع این نوع خاک به‌عنوان یک پوشش عایق به‌منظور جلوگیری از نشت مواد آلاینده و حفاظت از محیط‌زیست کاربرد دارد. هم‌چنین یکی از

اقتصادی‌ترین و قابل دسترس‌ترین مصالح برای احداث خاک‌ریز جاده‌ها، سنگ فرش معابر و اجرای سایر سازه‌های مهندسی می‌باشد.

جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده

مشخصات خاک	مقدار
وزن مخصوص دانه‌های جامد (G_s)	۲/۷۵
سیلت و رس (٪)	۷٤
ماسه (٪)	۲٦
شن (٪)	۰
حد روانی (LL) (٪)	۸۱
حد خمیری (PL) (٪)	۲۷/۵
شاخص خمیری (PI) (٪)	۵۳/۵
حد انقباض (SL) (٪)	۱٤/۵
درصد تورم آزاد (FS) (٪)	۲٦/٦
فشار تورمی (SP) (kPa)	٦۰۰
طبقه‌بندی سیستم متحد	CH
رطوبت بهینه (٪)	۲۲
وزن واحد حجم خشک بیشینه (kN/m^3)	۱٦

جدول ۲ ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد استفاده

مشخصه شیمیایی	مقدار
pH	۸/٤
(dS/m) EC	۱۳/۹
(meq/l) SO_4^{2-}	۱۱۲
(meq/l) Cl^-	٤۹
(meq/l)HCO_3^-	۲/٦
(meq/l)CO_3^{2-}	۰
(meq/l)Na^+	۱٤۲
(meq/l)Ca^{2+}	۲۱
(meq/l)Mg^{2+}	٦
(meq/l)K^+	۰/۳٤

ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این خاک بر اساس استاندارد ASTM تعیین شده و نتایج آن در جدول (۱) آورده شده‌است. با توجه به نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ و دانه‌بندی در سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) خاک مورد نظر رس با خاصیت خمیری زیاد (CH) طبقه‌بندی می‌گردد. هم‌چنین نتایج آزمایش تراکم استاندارد نشان می‌دهد که وزن واحد حجم خشک بیشینه این خاک ۱٦ kN/m^3 و رطوبت بهینه آن ۲۲٪ است. ویژگی‌های شیمیایی خاک نیز تعیین گردید و نتایج آن در جدول (۲) آورده شده‌است.

آب. در این پژوهش برای انجام تمامی آزمایش‌های اولیه (شناسایی) خاک مورد استفاده، تهیه محلول‌های نمک سدیم‌کلرید (NaCl) و کلسیم‌کلرید ($CaCl_2$)، ساخت نمونه‌های آزمایشی و مستغرق کردن آن‌ها درون دستگاه تحکیم از آب مقطر استفاده گردید. میزان اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) آب مقطر استفاده‌شده به‌ترتیب برابر ۷/٤ و ۰/۰۰۹ dS/m می‌باشد.

جدول ۳ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محلول‌های نمک مورد استفاده

مشخصه	سدیم-کلرید	کلسیم-کلرید
جرم مولی (g/mol)	۵۸/٤٤	۱۱۰/۹۹
pH محلول	۸/۲	۹/۳
(dS/m) EC	۳۹۱	۳۹۱
غلظت کل مواد جامد محلول (g/l)	۲۵۰	۲۵۰
درصد وزنی محلول (٪)	۲۲/۳	۲۲/۳۳
غلظت مولار محلول (mol/l)	٤/۲۸	۲/۲۵
چگالی محلول (mg/m^3)	۱/۱۲۱	۱/۱۲

محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید. در ایران، دریاچه‌های مختلفی با کیفیت‌های شیمیایی گوناگون آب وجود دارد که در فرایند تشکیل خاک نقش دارند؛ به‌عنوان مثال دریاچه ارومیه دارای آبی با شوری بیش از ۳۰۰ گرم بر لیتر می‌باشد[24]. بنابراین خاک رسوب‌یافته در این کیفیت آب، حاوی مایع منفذی با کیفیت غیر از آب طبیعی می‌شود. لذا در این پژوهش، نمونه‌هایی با مایع منفذی محلول سدیم‌کلرید با غلظت ۲۵۰ گرم بر لیتر انتخاب گردید و برای مقایسه، نمونه‌هایی حاوی مایع منفذی آب مقطر و کلسیم‌کلرید با غلظت ۲۵۰ گرم بر لیتر در نظر گرفته شد و اثر آن‌ها بر پتانسیل تورمی، فشار تورمی و منحنی مشخصه

آب و خاک، تعیین گردید. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محلول‌های نمک مورد استفاده در جدول (۳) آورده شده‌است.

تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی

برای تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی، ابتدا آزمایش تراکم استاندارد بر روی نمونه‌هایی از خاک که با مایع منفذی مختلف (آب مقطر، محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید) تهیه شده بودند، صورت پذیرفت. سپس با استفاده از منحنی‌های تراکمی به‌دست‌آمده، اقدام به ساخت نمونه‌های لازم برای انجام آزمایش‌های تورمی گردید. ساخت نمونه به این ترتیب بود که روی شاخه خشک منحنی تراکم مربوط به هر مایع منفذی، نقطه‌ای که رطوبت آن ۵٪ کمتر از رطوبت بهینه بود، انتخاب و وزن واحد حجم خشک متناظر با آن از منحنی مذکور تعیین گردید. سپس رطوبت اولیه هر کدام از نمونه‌ها با افزودن مایع مربوطه به رطوبت انتخاب شده از منحنی تراکمی رسانده شد. نمونه‌های حاصله در یک قالب ویژه و به‌وسیله یک دستگاه بارگذاری نشان داده شده در شکل (۱) (مشابه با دستگاه و قالب به‌کار برده شده توسط سلطانی و استبرق[25]) در سه لایه با اعمال بار استاتیکی متراکم گردیدند. مقدار بار وارده به هر لایه از روش سعی و خطا تعیین گردید و سرعت بارگذاری نیز ۱/۵ mm/min انتخاب شد. فشار وارد شده به هر لایه یکسان بود و مقدار آن به‌گونه‌ای تعیین گردید که وزن واحد حجم خشک و درصد رطوبت نمونه ساخته‌شده، معادل مشخصات نقطه انتخابی روی شاخه خشک منحنی استاندارد تراکمی مربوطه گردد. نمونه‌های تهیه شده از این روش دارای ابعادی معادل قالب دستگاه تحکیم مورد استفاده (ارتفاع ۲ سانتی‌متر و قطر ۷/۵ سانتی‌متر) می‌باشند. علت استفاده از روش تراکم استاتیکی به‌جای تراکم دینامیکی به‌منظور ساخت نمونه‌های آزمایشی، این است که تراکم استاتیکی تطابق و شباهت بیشتری با شرایط موجود در طبیعت دارد (به‌عنوان مثال پدیده رسوب‌گذاری نوعی تراکم استاتیکی است) و از این رو شرایط واقعی‌تری از پدیده تورم و انقباض را نشان می‌دهد. مطابق با نظر پژوهشگران مختلف از جمله استبرق و همکاران[26] و ویلر و سیواکومار[27]، تراکم استاتیکی سبب ایجاد نمونه‌هایی یک‌نواخت‌تر و تکرارپذیرتر نسبت‌به تراکم دینامیکی می‌گردد.



شکل ۱ الف) قالب و ب) دستگاه بارگذاری به‌منظور ساخت نمونه‌ها

آزمایش‌ها

در این پژوهش آزمایش‌های تورم آزاد، فشار تورمی، تعیین منحنی مشخصه آب و خاک، SEM و تعیین پتانسیل و فشار تورمی نمونه‌های خاک با سه کیفیت مایع منفذی متفاوت (آب مقطر، محلول سدیم‌کلرید و محلول کلسیم‌کلرید) در مکش‌های مختلف، صورت پذیرفت. لازم به ذکر است که تمامی آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش با سه بار تکرار صورت پذیرفت که میانگین نتایج آن‌ها به‌عنوان نتیجه نهایی، گزارش گردید. در ادامه به شرح آزمایش‌های مورد نظر پرداخته می‌شود.

آزمایش تورم آزاد و فشار تورمی

در این پژوهش، آزمایش تورم آزاد با استفاده از دستگاه تحکیم معمولی یا ادومتر و بر اساس استاندارد ASTM-D4546-08 بر روی نمونه‌های خاک با کیفیت‌های مختلف مایع منفذی صورت پذیرفت. به‌منظور انجام این آزمایش، ابتدا نمونه مطابق با شرایط مورد نظر تهیه گردید. پس از تهیه نمونه و قرار دادن آن در دستگاه تحکیم، بدون اعمال هرگونه سرباری، نمونه با آب مقطر مستغرق و میزان تغییر ارتفاع آن (ΔH) در گام‌های زمانی مختلف با استفاده از اندازه‌گیر قرائت و ثبت گردید. ثبت این تغییرات تا ثابت شدن (تغییرات) ارتفاع نمونه ادامه یافت. سپس بر اساس داده‌های ثبت شده، میزان درصد تورم خاک مورد آزمایش در زمان‌های مختلف بر اساس رابطه زیر تعیین گردید:

$$FS\,(\%) = \frac{\Delta H}{H_0} * 100 \qquad (۱)$$

که در رابطه فوق:

FS درصد تورم آزاد، ΔH میزان تغییرشکل یا ارتفاع نمونه در زمان مورد نظر(mm)، H_0 ارتفاع اولیه نمونه آزمایشی یا ارتفاع قالب تحکیم (۲۰ میلی‌متر) می‌باشد.

لازم به ذکر است که درصد تورم نهایی (FS_{final}) مطابق با رابطه (۱)، با جای‌گذاری آخرین تغییرشکل ایجاد شده در نمونه آزمایشی (ΔH) که مقدار آن با گذشت زمان ثابت می‌شود، به‌دست می‌آید. تغییرات درصد تورم آزاد خاک مورد آزمایش در برابر زمان، از آغاز آزمایش تورم آزاد تا رسیدن به میزان تورم نهایی نشان‌دهنده منحنی تورم آزاد نمونه خاک می‌باشد.

به‌منظور انجام آزمایش فشار تورمی، از نمونه استفاده شده در آزمایش تورم آزاد استفاده گردید. برای این منظور پس از اتمام آزمایش تورم آزاد، با اعمال سربار و افزایش آن به نمونه خاک به‌صورت گام‌به‌گام از طریق سیستم بارگذاری اقدام به فشرده کردن نمونه تحت تأثیر بارهای مختلف گردید و تغییرشکل حاصله به‌ازای هر سربار از طریق اندازه‌گیر دستگاه قرائت و ثبت شد. اعمال فشار به نمونه تا جایی ادامه یافت که مقدار تغییرشکل حاصل از تورم آزاد در نمونه به‌طور کامل محو گردد. با ترسیم تغییرات درصد تغییرشکل در برابر فشار وارده به نمونه خاک، منحنی فشار تورمی به‌دست می‌آید. مقدار فشار تورمی نهایی (SP_{final}) برابر است با مقدار متناظر محل تلاقی منحنی فشار تورمی با محور افقی یا فشار اعمال شده به نمونه، یعنی نقطه‌ای که میزان تغییرشکل ایجادشده در نمونه برابر صفر گردد و یا ارتفاع نمونه به مقدار اولیه آن (۲۰ mm) رسیده باشد. برای تعیین میزان فشار تورمی در هر مرحله بارگذاری نمونه خاک از رابطه (۲) استفاده شد:

$$SP=\frac{F}{A} \qquad (۲)$$

که در رابطه فوق:

SP میزان فشار تورمی (kPa)، F نیروی اعمال شده به خاک توسط سامانه بارگذاری تحکیم (kN) و A سطح مقطع نمونه آزمایشی با قطر ۷۵ میلی‌متر می‌باشد.

تعیین منحنی مشخصه آب و خاک

منحنی مشخصه آب و خاک عبارت است از تغییرات مقادیر رطوبت وزنی، حجمی و یا درجه اشباع با مکش ماتریک. در آزمایشگاه معمولاً تعیین این منحنی با استفاده از روش فیلتر کاغذی و یا استفاده از صفحات فشاری امکان‌پذیر می‌باشد. فردلاند و رهاردجو [۲۸] بیان کردند که روش فیلتر کاغذی قادر به اندازه‌گیری مکش در محدوده وسیعی از مقادیر می‌باشد. در شرایط فعلی، روش مذکور به‌عنوان یک روش استاندارد برای اندازه‌گیری مکش شناخته شده‌است (ASTM-D5298-10). این روش نسبتاً ساده و قابل اجرا در آزمایشگاه است و به تجهیزات آزمایشگاهی ویژه‌ای نیاز ندارد. پژوهشگرانی مانند ریدلی و همکاران [۲۹] و لیونگ و همکاران [۳۰] بیان کردند که این روش، مناسب‌ترین روش برای تعیین مکش خاک است. در این پژوهش منحنی مشخصه آب و خاک با استفاده از روش فیلتر کاغذی و بر اساس استاندارد ذکر شده، تعیین گردید.

تعیین پتانسیل تورمی و فشار تورمی در مکش‌های مختلف

هدف از انجام این کار تحقیقاتی تعیین تغییرات پتانسیل تورمی و فشار تورمی با مکش (درصد رطوبت) برای نمونه‌های تهیه شده با مایعات منفذی مختلف می‌باشد. از نتایج منحنی تغییرات درصد تورم مقابل زمان به‌دست‌آمده از نمونه‌های خاک با سه کیفیت مختلف مایع منفذی، به‌منظور مشخص کردن زمان‌های مناسب برای تعیین درصد تورم در مقابل مکش استفاده گردید. سپس نمونه‌های تهیه شده مستغرق گردیدند، به‌طوری که مدت زمان انجام این مرحله مطابق با زمان انتخاب شده بود. بنابراین تحت تأثیر این شرایط، نمونه‌های مختلف بعد از رسیدن به درصد تورم در زمان مشخص، از دستگاه خارج شدند و رطوبت آن‌ها اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از منحنی مشخصه آب و خاک، مکش مربوط به این درصد رطوبت تعیین گردید. به‌عبارت دیگر درصد تورم در مکش مربوطه برای نمونه‌های مختلف مشخص شد. فشار تورمی نیز روی نمونه‌های مشابه و در زمان‌های مشخص تعیین گردید و در نتیجه برای مکش‌های مختلف، درصد تورم و فشارتورمی در رابطه با نمونه‌های خاک با کیفیت‌های مختلف مایع منفذی برآورد شد.

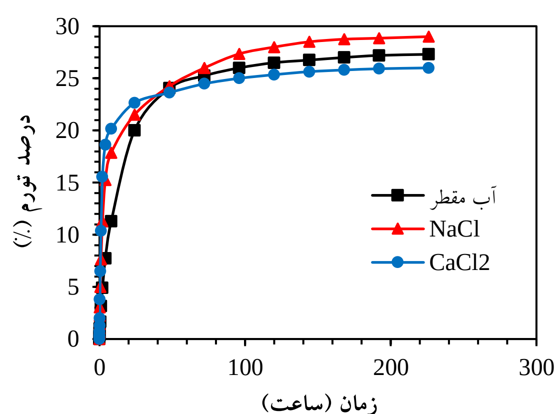
SEM

آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی، امکان بررسی ریزساختار خاک در ابعاد میکرونی را فراهم کرده‌است. برای تهیه تصاویر SEM لازم است نمونه خشک باشد و به ابعاد کوچک

(حجم ۱ سانتی‌متر مکعب) در آمده باشد. همچنین عمل پوشش-دهی طلا روی نمونه قبل از عکس‌برداری می‌بایست صورت بگیرد. در این پژوهش، تصاویر SEM نمونه‌های خاک با سه کیفیت مایع منفذی آب مقطر، محلول سدیم‌کلرید و محلول کلسیم‌کلرید در دو حالت قبل و بعد از انجام آزمایش تورم آزاد بررسی شده‌است. این آزمایش در آزمایشگاه SEM پژوهشگاه مواد و انرژی به انجام رسید.

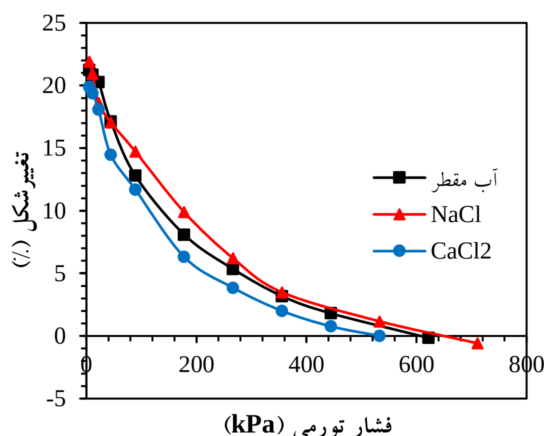
نتایج

نتایج آزمایش تورم آزاد برای خاک با سه کیفیت مختلف مایع منفذی (آب مقطر، محلول سدیم‌کلرید و محلول کلسیم‌کلرید) در شکل (۲) نشان داده شده‌است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، درصد تورم نمونه ساخته‌شده با مایع منفذی آب مقطر پس از حدود ۲۲۶ ساعت به تعادل رسیده‌است و میزان تورم آزاد آن ٪ ۲٦/٦ به‌دست آمده‌است. این در صورتی است که میزان تورم آزاد نمونه حاوی محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم-کلرید به‌ترتیب برابر ٪ ۲۹/۷ و ٪ ۲٦/۲ می‌باشد.



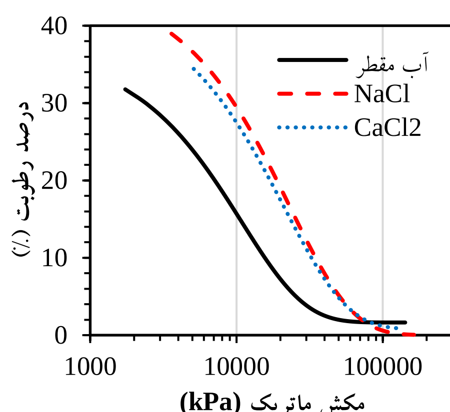
شکل ۲ منحنی تغییرات درصد تورم با زمان در رابطه با نمونه‌های خاک با سه کیفیت مختلف مایع منفذی

منحنی فشار تورمی برای نمونه با کیفیت‌های مایع منفذی گوناگون، در شکل (۳) نشان داده شده‌است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، میزان فشار تورمی نهایی برای نمونه‌های حاوی مایع منفذی آب مقطر، محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید به‌ترتیب برابر ٦۰۰، ٦۱۷/٥ و ٥۸۳/٥ کیلوپاسکال تعیین گردیده‌است.



شکل ۳ منحنی تغییرات درصد تغییرشکل با فشار اعمال شده به نمونه‌های خاک با سه کیفیت مختلف مایع منفذی

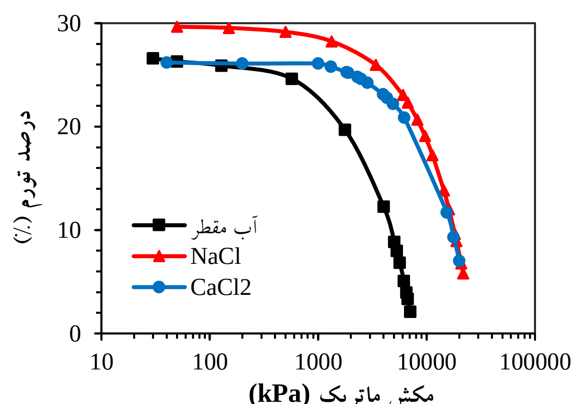
منحنی مشخصه آب و خاک برای نمونه‌های ساخته شده با کیفیت‌های مختلف مایع منفذی (آب، محلول سدیم‌کلرید و محلول کلسیم‌کلرید) در شکل (٤) نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌ازای هر رطوبت ثابتی، نمونه حاوی مایع منفذی سدیم‌کلرید دارای مکش ماتریک بیشتری نسبت‌به دو کیفیت دیگر مایع منفذی می‌باشد. در واقع محلول سدیم‌کلرید سبب ایجاد مکش ماتریک بیشتری در مقایسه با آب مقطر و محلول کلسیم‌کلرید شده‌است.



شکل ٤ منحنی مشخصه آب و خاک برای نمونه‌های خاک تهیه شده با سه کیفیت مختلف مایع منفذی

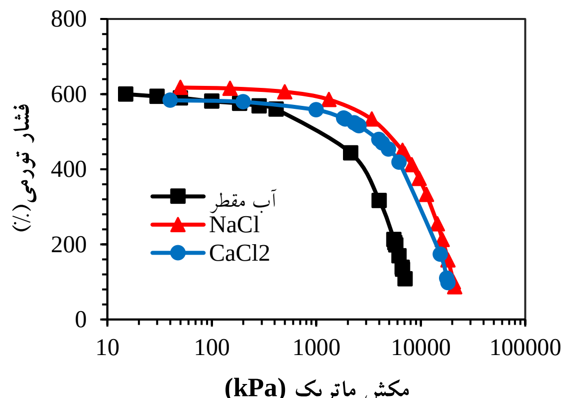
همان‌طور که بیان شد، درصد رطوبت نمونه‌های خاک با کیفیت‌های مختلف مایع منفذی در زمان‌های متفاوت تعیین گردید. سپس با استفاده از منحنی‌های مشخصه آب و خاک

(شکل ٤) مکش ماتریک به‌ازای نتایج درصد رطوبت، تعیین شد. شکل (٥) تغییرات درصد تورم نمونه‌های مختلف خاک در برابر مکش ماتریک را که با انجام آزمایش مشخص گردید، نشان می-دهد. همان‌طور که در شکل (٥) مشاهده می‌شود، با افزایش مکش درصد تورم خاک برای هر سه نمونه کاهش می‌یابد. هم‌چنین می‌توان مشاهده کرد که استفاده از محلول‌های سدیم-کلرید و کلسیم‌کلرید، موجب افزایش مکش ماتریک در خاک به‌ازای یک درصد تورمی ثابت می‌شود. هم‌چنین این شکل نشان می‌دهد که در مکش‌های زیاد، محلول کلسیم‌کلرید رفتار تورمی مشابهی را در مقایسه با محلول سدیم‌کلرید دارد و منحنی این دو به‌هم نزدیک است. لیکن با کاهش مکش، منحنی مربوط به نمونه خاک حاوی محلول کلسیم‌کلرید به‌سمت منحنی نمونه خاک حاوی محلول آب مقطر متمایل می‌شود. به‌عبارت دیگر رفتار تورمی آن به رفتار تورمی آب مقطر نزدیک‌تر می‌شود. در واقع فقط در حالت رطوبت اشباع (مکش ماتریک صفر)، درصد تورم نمونه حاوی مایع منفذی آب مقطر ٠/٤ ٪ بیشتر از درصد تورم نمونه ساخته‌شده با مایع منفذی محلول کلسیم‌کلرید می‌باشد و این مقدار نیز نامحسوس است. با افزایش مکش مقدار تورم آزاد محلول کلسیم‌کلرید بیشتر از آب مقطر می‌شود و هرچه میزان مکش بیشتر شود، اختلاف آن‌ها بیشتر می‌گردد.



شکل ٥ تغییرات درصد تورم با مکش در رابطه با نمونه‌های خاک با سه کیفیت مختلف مایع منفذی

شکل (٦) تغییرات فشار تورمی نمونه‌های خاک را در برابر مکش ماتریک نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، فشار تورمی نمونه‌های خاک با کیفیت‌های گوناگون مایع منفذی با افزایش مکش، کاهش می‌یابد. این شکل هم‌چنین نشان می‌دهد که در مکش‌های زیاد، فشار تورمی خاک با مایع منفذی محلول کلسیم‌کلرید بیشتر از خاک با مایع منفذی آب مقطر می‌باشد، لیکن در مکش‌های نزدیک به صفر این رابطه معکوس می‌شود.

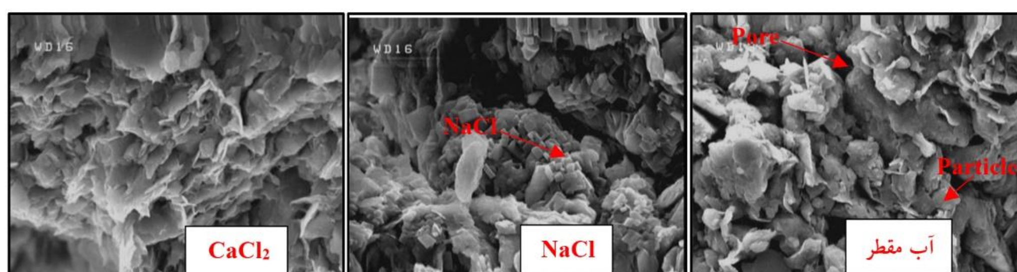


شکل ٦ تغییرات فشار تورمی با مکش در رابطه با نمونه‌های خاک با سه کیفیت مختلف مایع منفذی

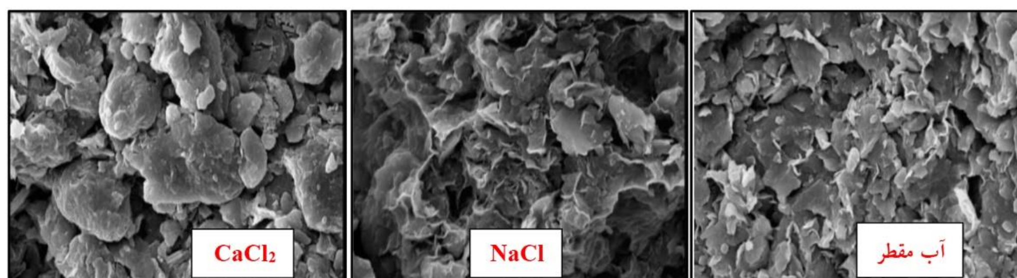
در جدول (٤) نتایج تمامی آزمایش‌ها برای چندین زمان مختلف، از ابتدای مستغرق کردن نمونه و هم‌چنین در طول آزمایش آورده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد زیادی از تغییرات در ٤٨ ساعت اولیه رخ داده‌است. لازم به ذکر است که در جدول (٤) تعداد محدودی از داده‌های مربوط آورده شده‌است؛ به‌عنوان مثال داده‌های منحنی‌های مندرج در شکل‌های (٥) و (٦)، شامل نتایج ١٢ آزمایش با سه بار تکرار در زمان‌های مختلف می‌باشد. به‌طوری‌که برای استحصال آن‌ها در مجموع ٣٦ آزمایش (با در نظر گرفتن سه تکرار) انجام گردیده که در این جدول تنها نتایج ٤ آزمایش برای هر یک از مایعات منفذی آورده شده‌است.

جدول ٤ مقادیر تورم، فشار تورمی، رطوبت و مکش در رابطه با نمونه‌های خاک با سه کیفیت مختلف مایع منفذی در زمان‌های متفاوت

نمونه	ساعت	تورم (٪)	فشار تورمی (kPa)	رطوبت (٪)	مکش (kPa)
آب مقطر	۱	۳/۳۳	۱۳۳/٦۲	۲۰/٦٦	٦۷۲٦/٤٤
	۸	۸/۸٥	۲۱۲/۸۸	۲۳/۸٤	٥۰٥۲/۱٤
	٤۸	۲۲/٦۰	٥٥۹/۷٤	۳٥/۱۸	٥۷٤/۰۲
	۲٤۰	۲٦/٦۰	٦۰۰	۳۷/۲۰	۳۰
NaCl	۱	٦/۷۷	۹۹/٤٤	۱۸/۳٦	۲۰۸٥٦/۰۱
	۸	۱۷/۲٤	۳۳۳/۰۳	۲۷/۸۰	۱۱۳۳۷/۹۱
	٤۸	۲٤/۲٥	٤٤۰/٦٦	۳۳/۹۹	٦۷۲۷/۱٤
	۲٤۰	۲۹/٦٦	٦۱۷/٤۹	٤۳/۰۱	٥۰
$CaCl_2$	۱	۹/۳۱	۱۰۹/۷۲	۱۹/۲۸	۱۷۷۸٥/۷۳
	۸	۲۲/۸	٤٦۹/۷۸	۳٥/۷۲	٤۳۰۰/۳
	٤۸	۲٤/٦۱	٥۱۸/۲۸	۳۸/۸٤	۲٤۸٤/۰۳
	۲٤۰	۲٦/۲۰	٥۸۳/٥۳	٤۰/۰۲	٤۰



الف



شکل ۷ تصاویر SEM با بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر در رابطه با نمونه‌های خاک تهیه‌شده با سه کیفیت مختلف مایع منفذی، الف) قبل از شروع آزمایش تورم‌آزاد و ب) در پایان آزمایش تورم‌آزاد

شکل (۷) تصاویر SEM نمونه‌های خاک با سه کیفیت مایع منفذی آب مقطر، سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید را در دو حالت قبل و بعد از انجام آزمایش تورم آزاد نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۷- الف) مشاهده می‌گردد، نمونه حاوی مایع منفذی آب مقطر دارای ساختار لخته می‌باشد که با اضافه کردن محلول‌های نمک، درجه لخته شدن نمونه‌های خاک افزایش می‌یابد. هم‌چنین شکل (۷- ب) نشان می‌دهد که با انجام آزمایش تورم آزاد، درجه لخته شدن نمونه‌های خاک با سه کیفیت مایع منفذی مختلف در مقایسه با حالت قبل از شروع آزمایش، افزایش قابل

توجهی داشته‌است که تغییر ذکرشده در نمونه حاوی مایع منفذی کلسیم‌کلرید، بیشتر از دو نمونه دیگر بوده‌است. هم‌چنین مقایسه ساختار دو نمونه حاوی مایع منفذی سدیم‌کلرید در دو حالت قبل و بعد از آزمایش تورم آزاد (شکل‌های ۷– الف و ۷– ب) نشان می‌دهد که قبل از آزمایش تورم آزاد، بخشی از محلول سدیم‌کلرید به‌صورت بلور نمک بین ذرات خاک قرار گرفته‌است که این بلورها با انجام آزمایش تورم آزاد در نمونه حل شده و یا از آن خارج شده‌است. هم‌چنین مقایسه ساختار نمونه‌های تهیه‌شده قبل از آزمایش تورم آزاد (شکل ۷– الف) نشان می‌دهد که ذرات، دارای ساختار لخته و چسبیده به‌هم می‌باشند. لیکن در خاتمه آزمایش (شکل ۷– ب) ذرات به‌صورت جدا از هم درآمده‌اند. به‌عبارت دیگر در نمونه حاوی مایع منفذی آب مقطر، هیچ‌گونه پیوندی بین ذرات مشاهده نمی‌شود و این پیوندها در نمونه‌های با مایع منفذی کلسیم‌کلرید و سدیم‌کلرید نیز کاهش یافته‌است. بنابراین در طول انجام آزمایش تورم، ساختار اولیه خاک دستخوش تغییر می‌گردد.

بحث

ذرات خاک‌های رسی دارای بار الکتریکی منفی می‌باشند و وقتی که آب به رس اضافه می‌شود، کاتیون‌ها و آنیون‌هایی که در بین ذرات وجود دارند، در آب شناور می‌شوند. بنابراین اطراف ذرات رس را مایعی که حاوی این آنیون‌ها و کاتیون‌ها می‌باشد، فرا می‌گیرد. در این مایع و در نزدیکی لایه رس، غلظت کاتیون‌ها زیاد و غلظت آنیون‌ها کم است که با فاصله گرفتن از لایه رس، غلظت کاتیون‌ها کاهش و غلظت آنیون‌ها افزایش می‌یابد، تا این‌که کاتیون‌ها و آنیون‌ها به تعادل برسند. این لایه آب که اطراف لایه رس را فرا گرفته و حاوی ذرات باردار می‌باشد، لایه مضاعف نامیده می‌شود که ضخامت آن به عوامل متعددی مانند درجه حرارت، ثابت دی‌الکتریک، غلظت الکترولیت و... بستگی دارد. تغییر در ضخامت لایه مضاعف، موجب دگرگونی در ساختار خاک می‌گردد به‌طوری‌که کاهش ضخامت آن موجب افزایش نیروهای جاذبه و ایجاد ساختمان لخته و افزایش ضخامت آن موجب ایجاد ساختمان پراکنده می‌گردد. از خصوصیات دیگر ذرات رس، خاصیت تبادل یونی آن‌ها می‌باشد. به‌طور کلی نوع و مقدار کاتیون‌های تبادلی تابعی از ظرفیت و شعاع آب هیدراته آن‌ها می‌باشد. کاتیون‌هایی که دارای ظرفیت بیشتری می‌باشند، با نیروی زیادتری نسبت‌به کاتیون‌های دارای ظرفیت پایین‌تر جذب می‌گردند. در ظرفیت مساوی نیز کاتیون با شعاع آب هیدراته کمتر با نیروی بیشتری نسبت‌به کاتیون با شعاع آب هیدراته بیشتر، جذب ذره رس می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که وقتی نمونه‌ها با مایع حاوی کلسیم‌کلرید ساخته می‌شوند، یون‌های کلسیم نسبت‌به یون‌های سدیم با قدرت بیشتری جذب لایه رس می‌گردد. در این حالت ساختمان خاک حالت لخته‌شده‌تری نسبت‌به سدیم‌کلرید دارد و ذرات به‌هم چسبیده و دارای سطح ویژه کمتری می‌باشند و در نتیجه مقدار پتانسیل تورمی کاهش می‌یابد. تبادل یونی در نمونه خاک تهیه شده از مایع منفذی محلول سدیم‌کلرید نسبت‌به نمونه حاوی آب مقطر بیشتر صورت می‌پذیرد، بنابراین دارای پتانسیل تورمی بیشتری نسبت‌به آب مقطر است. در هر صورت همان‌طور که نتایج SEM (شکل ۷– الف) نشان می‌دهد، نمونه‌های تهیه شده با کیفیت‌های مختلف مایع منفذی، دارای ساختار متفاوت می‌باشند که این امر نقش مهمی در پتانسیل تورمی آن‌ها دارد. همان گونه که بیان شد نمونه‌های ساخته شده، در حالت غیراشباع می‌باشند و وقتی که مستغرق می‌گردند، ابتدا مکش ماتریک آن‌ها از بین می‌رود و سپس مکش اسمزی نقش مهمی در رفتار تورمی خاک ایفا می‌کند.

نتایج شکل‌های (۲) و (۳) نشان می‌دهند که وجود محلول سدیم‌کلرید به‌عنوان مایع منفذی، فاکتورهای تورم آزاد و فشار تورمی خاک را نسبت‌به آب مقطر به‌ترتیب به‌میزان ۱۱/۵٪ و ۲/۹۵٪ افزایش می‌دهد و وجود کلسیم‌کلرید، تورم آزاد و فشار تورمی خاک را نسبت‌به آب مقطر به‌ترتیب به‌میزان ۱/۵ ٪ و ۲/۷۵ ٪ کاهش می‌دهد. خواص فیزیکی و شیمیایی مایع منفذی مانند اسیدیته (pH)، درجه حرارت، ثابت دی‌الکتریک، نوع یون‌های محلول و... تأثیر به‌سزایی بر پتانسیل تغییر حجم خاک دارد به‌طوری‌که عمل متقابل بین مایع منفذی و ذرات رس می‌تواند موجب کاهش و یا افزایش ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف و در نتیجه تغییر ساختمان خاک گردد[31,33]. میزان تورم آزاد نمونه ساخته‌شده با محلول کلسیم‌کلرید کمتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد (شکل ۲). همان طور که بیان شد یون کلسیم با نیروی بیشتری نسبت‌به یون سدیم به ذرات خاک متصل می‌شود که با مستغرق کردن نمونه‌ها، امکان جدایی یون کلسیم از ذرات رس خیلی کمتر از یون سدیم است و خاک از ساختار لخته‌شده برخوردار است. بنابراین در این حالت ذرات به‌هم چسبیده‌اند و

از قدرت تورمی کمتری برخوردار هستند. در نمونه‌های ساخته‌شده از محلول سدیم‌کلرید، یون‌های سدیم با نیروی کمتری نسبت‌به یون کلسیم به ذرات رس متصل‌اند و هنگام مستغرق کردن نمونه، امکان جدا شدن آن‌ها از ذرات رس بیشتر است. بنابراین درجه لخته شدن خاک نسبت‌به محلول کلسیم-کلرید کاهش می‌یابد و در نتیجه قدرت تورمی آن افزایش می‌یابد. شکل (۲) نشان می‌دهد که نمونه تهیه شده از آب مقطر حالت بینابین دارد، زیرا مایع منفذی آن، فاقد هرگونه یون می‌باشد و فقط پدیده آب‌شویی در نمونه رخ می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده (شکل ۲) با پژوهش‌های انجام شده توسط پولات و همکاران [34]، دلج و همکاران[35] و بوازا و همکاران [36] مطابقت دارد. لیکن با نتایج ارائه‌شده توسط رائو و شیواناندا [13] مغایرت دارد که نوع خاک و میزان غلظت محلول‌های نمکی به‌کار برده شده، ممکن است در این امر تأثیرگذار باشد و سبب بروز این عدم هماهنگی شده باشد.

شکل (۳) تغییرات فشار تورمی را برای نمونه‌های خاک با مایع منفذی مختلف نشان می‌دهد. در شکل (۳) مشاهده می‌گردد که در حالت اشباع (مکش صفر)، فشار تورمی نمونه با مایع منفذی محلول کلسیم‌کلرید، کمتر از نمونه‌های حاوی مایع منفذی آب مقطر و سدیم‌کلرید می‌باشد. شکل (۷- ب) تصاویر SEM را در حالت مکش صفر برای نمونه‌های با مایع منفذی مذکور نشان می‌دهد. ساختمان نمونه حاوی مایع منفذی آب مقطر در حالت مکش صفر، متشکل از ذرات نسبتاً ورقه‌ای‌شکل است که بدون هیچ‌گونه اتصالی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، درحالی‌که ساختمان نمونه خاک ساخته‌شده با محلول سدیم‌کلرید، به‌صورت صفحات ورقه‌ای مجتمع شده است و فضاهای بین ذرات آن در مقایسه با نمونه حاوی آب مقطر، نسبتاً بیشتر است. علاوه‌بر این ساختار نمونه خاک حاوی مایع منفذی کلسیم‌کلرید نیز در شکل (۷- ب) آورده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ذرات به‌صورت چسبیده به‌هم (لختگی با درجه زیاد) با فضاهای بسیار زیاد در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. حال اگر این سه نمونه تحت تأثیر بار یکسان قرار بگیرند، تغییر مکان ذرات در نمونه حاوی مایع منفذی کلسیم‌کلرید در مقایسه با دو نمونه دیگر بیشتر است، زیرا در این نمونه ذرات به‌صورت چسبیده به‌هم و با فضاهای نسبتاً بزرگی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. این تغییرشکل و جابه‌جایی ذرات در نمونه حاوی آب مقطر به‌علت کمتر بودن درجه لختگی، کمتر از نمونه حاوی کلسیم‌کلرید است. بنابراین برای رسیدن به حالت اولیه قبل از تورم، نیروی بیشتری لازم است که این امر سبب افزایش فشار تورمی می‌شود.

شکل (٤)، منحنی‌های مشخصه آب و خاک را برای نمونه-هایی از خاک با کیفیت شیمیایی مایعات منفذی مختلف (آب مقطر، محلول‌های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید) نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در یک درصد مشخصی از رطوبت، مکش برای آب مقطر کمتر از دو مایع منفذی دیگر است. این نتایج با یافته‌های فردلاند و رهاردجو [۲۸] مطابقت دارد. آن‌ها بیان کردند که اگر غلظت یونی مایع منفذی افزایش یابد، مکش کل نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین از آن‌جا که غلظت یونی سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید بیشتر از آب مقطر می‌باشد، مکش حاصل از آن‌ها در مقایسه با آب مقطر افزایش یافته‌است (شکل ٤). این نتایج با یافته‌های آزمایشگاهی پژوهشگرانی مانند پولات و همکاران [۳٤] نیز هماهنگ می‌باشد. از طرفی بایراک [۳۷] در سال ۲۰۰۸ از پژوهش‌های خود نتیجه گرفت که مایعات منفذی که حاوی محلول‌هایی با یون‌های دو ظرفیتی مانند کلسیم و یا منیزیم می‌باشند، مکش بیشتری در مقایسه با محلول‌هایی با یون-های تک‌ظرفیتی مانند سدیم و پتاسیم ایجاد می‌کنند، لیکن نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش خلاف این نتیجه‌گیری را نشان می-دهد. عدم انطباق این امر ممکن است به این دلیل باشد که وی از خاک بنتونیت در پژوهش خود استفاده کرده‌است. لیکن پولات و همکاران نشان دادند که اگر مایع منفذی حاوی یون‌های دو ظرفیتی باشد، مکش کمتری را در مقایسه با یون تک‌ظرفیتی ایجاد می‌نماید که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. هم‌چنین باید توجه داشت از آن‌جا که مکش ماتریک ارتباط مستقیمی با شعاع موییگی بین ذرات دارد، بنابراین با توجه به نتایج می‌توان بیان نمود که شعاع موییگی در نمونه ساخته‌شده با آب مقطر بیشتر از سایر محلول‌ها می‌باشد و در نتیجه مکش ایجادشده در آن در رطوبت ثابت، کمتر از سایر محلول‌ها است. مکش کل در خاک شامل دو نوع مکش ماتریک و اسمزی می‌باشد. افزودن محلول-های سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید به خاک به‌عنوان مایع منفذی، سبب افزایش مکش اسمزی خاک نسبت‌به شرایط مایع منفذی آب مقطر می‌گردد و در نتیجه مکش کل نیز افزایش می‌یابد. مطابق با نظر فردلاند و رهاردجو [28]، افزایش در مکش کل سبب افزایش در مکش ماتریک و اسمزی به‌طور هم‌زمان می-گردد. افزایش در مکش ماتریک خاک در شرایط استفاده از

محلول‌های نمک به‌عنوان مایع منفذی نیز بر همین اساس قابل توجیه است. رابطه‌ای بین مکش ماتریک و درصد تورم در شکل (۵) برای کیفیت‌های گوناگون مایع منفذی شامل آب مقطر، محلول سدیم‌کلرید و محلول کلسیم‌کلرید نشان داده شده‌است. پاندیا و ساچن [۳۸] اعلام کردند که هر قدر میزان مکش ماتریک خاک بیشتر باشد، مقدار تورم و فشار تورمی آن کمتر است. با توجه به شکل‌های (۵) و (٦) نتایج این گزارش با یافته‌های این پژوهشگران مطابقت دارد.

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود با افزایش مکش، درصد تورم برای هر سه نمونه خاک کاهش می‌یابد. هم‌چنین می‌توان مشاهده کرد که استفاده از سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید موجب افزایش مکش ماتریک در خاک به‌ازای یک درصد تورم مشخص می‌شود. بررسی نتایج در این شکل نشان می‌دهد که محلول کلسیم‌کلرید در مکش‌های زیاد، رفتار تورمی مشابه سدیم‌کلرید دارد و منحنی این دو به‌هم نزدیک است. لیکن با کاهش مکش، منحنی محلول کلسیم‌کلرید به‌سمت منحنی محلول آب مقطر متمایل می‌شود و رفتار تورمی آن نیز به رفتار تورمی آب مقطر نزدیک‌تر می‌شود. در واقع فقط در رطوبت اشباع (مکش ماتریک صفر)، درصد تورم آب مقطر بیشتر از درصد تورم محلول کلسیم‌کلرید می‌باشد و این مقدار نیز نامحسوس است. با افزایش مکش ماتریک، مقدار تورم محلول کلسیم‌کلرید بیشتر از آب مقطر می‌شود و هر قدر میزان مکش افزایش یابد، اختلاف آن‌ها بیشتر می‌گردد. این نتایج نشان می‌دهند که رفتار تورمی خاک در مکش‌های غیرصفر بسیار متفاوت‌تر از مکش صفر می‌باشد که دلیل این تفاوت رفتاری این است که در حالت اشباع (مکش صفر)، خصوصیات تورمی خاک تحت تأثیر مکش اسمزی قرار دارد. این در حالی است که در شرایط غیراشباع (مکش‌های غیرصفر) علاوه‌بر مکش اسمزی، مکش ماتریک نیز بر خصوصیات تورمی خاک اثر می‌گذارد و هر قدر مقدار مکش ماتریک در خاک بیشتر باشد، تأثیر آن بر قدرت تورمی نمونه نیز مشهودتر است [۳۹].

شکل (٦) تغییرات مکش ماتریک و فشار تورمی خاک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است با افزایش مکش، فشار تورمی نمونه‌های خاک با کیفیت‌های گوناگون مایع منفذی کاهش می‌یابد. لیانگ و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۲۱، طی انجام آزمایش‌های متعدد روی نمونه‌هایی از یک خاک متورم‌شونده با چگالی‌های مختلف، با ایجاد مکش به‌روش اسمزی و تعیین توزیع مایع منفذی در نمونه به‌وسیله NRM نتیجه‌گیری کردند که روند افزایش فشار تورمی با کاهش مکش، غیریک‌نواخت می‌باشد. آن‌ها این پدیده را به شرایط توزیع مایع منفذی در توده خاک مرتبط دانستند. از آن‌جا که در آن روش، شرایط انجام آزمایش با شرایط انجام‌شده در این کار پژوهشی متفاوت می‌باشد، به همین دلیل نتایج یکسان نیست و نمی‌توان آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد. این شکل هم‌چنین نشان می‌دهد که فشار تورمی محلول سدیم‌کلرید، همواره بیشتر از دو محلول دیگر می‌باشد و هم‌چنین در مکش‌های زیاد، فشار تورمی خاک با مایع منفذی محلول کلسیم‌کلرید بیشتر از خاک با مایع منفذی آب مقطر است. لیکن در مکش‌های نزدیک به صفر، این رابطه معکوس می‌شود. همان‌طور که نتایج SEM (شکل ۷– الف و ب) نشان می‌دهد، در مکش‌های بالا، سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید سبب اتصالاتی بین ذرات می‌گردد که این امر منجر به افزایش مقاومت در برابر تغییرشکل ناشی از اعمال بار وارده می‌شود و این موضوع در افزایش فشار تورمی در مقایسه با نمونه ساخته‌شده با آب مقطرنیز نقش مهمی ایفا می‌کند. هم‌چنین شکل‌های (۵) و (٦) نشان می‌دهند که فشار تورمی و هم‌چنین درصد تورم خاک در مکش‌های کم، تقریباً ثابت هستند و کاهش آن‌ها از یک میزان مکش مشخص شروع می‌شود. به این میزان مکش مشخص، نقطه ورود هوا (AEV) گفته می‌شود که برای خاک با مایعات منفذی گوناگون متفاوت است. در این پژوهش، نقطه ورود هوا برای مایعات منفذی مختلف مطابق با روش فردلاند و زینگ [۴۰] به‌دست آمد و نتایج نشان داد که نقطه ورود هوای نمونه حاوی محلول سدیم‌کلرید بیشتر از دو نمونه دیگر می‌باشد. هم‌چنین از شکل‌های (۵) و (٦) مشخص می‌شود که کاهش درصد تورم و پتانسیل تورمی همراه با افزایش مکش، به شرطی امکان‌پذیر است که مکش موجود در خاک بیشتر از مکش نقطه ورود هوا باشد. بنابراین با توجه به این نتایج می‌توان گفت که اگر عملیات به‌سازی برای شرایطی با مکش غیرصفر خاک باشد، مقدار فشار تورمی و تورم آزاد آن خاک کمتر از حالت مکش صفر می‌شود. به‌عنوان مثال در شرایطی که مکش در خاک ۳۰۰۰ کیلوپاسکال باشد، مقدار تورم آزاد برای نمونه‌هایی با مایع منفذی آب مقطر،

سدیم‌کلرید و کلسیم‌کلرید، به‌ترتیب ٤٤، ٧ و ٤/٥ ٪ کاهش می‌یابد و فشار تورمی خاک نیز به همین ترتیب به‌میزان ٣٣، ١٤/٢ و ١٤/١ ٪ کاهش می‌یابد. بنابراین مشخص است که هر قدر مقدار مکش ماتریک خاک در طول مدت زمان کاربرد آن بیشتر باشد، مقادیر درصد تورم آزاد و فشار تورمی آن نیز کاهش بیشتری نسبت‌به مکش صفر دارند و در نتیجه به‌سازی خاک آسان‌تر و اقتصادی‌تر خواهد بود .

نتیجه‌گیری

نتایج این کار پژوهشی نشان داد که فاکتورهای پتانسیل تورمی و فشار تورمی یک خاک متورم‌شونده، به کیفیت مایع منفذی آن بستگی دارد به‌طوری‌که اگر نمونه خاک حاوی مایع منفذی محلول سدیم‌کلرید باشد، میزان تورم آزاد آن به‌میزان ١٠/٣ و ١١/٧٪ بیشتر از نمونه‌هایی با مایع منفذی آب مقطر و محلول کلسیم‌کلرید است. از طرفی مقدار فشار تورمی آن نیز در شرایط یاد شده به‌میزان ٢/٨ و ٥/٥٪ بیشتر از نمونه‌های با مایعات منفذی آب مقطر و محلول کلسیم‌کلرید می‌باشد. از طرف دیگر بر اساس منحنی‌های مشخصه نمونه‌های خاک با مایعات منفذی متفاوت، نتیجه‌گیری شد که مقادیر پتانسیل تورمی و فشار تورمی تابعی از مکش یا رطوبت جذب شده نمونه می‌باشد. این مقادیر در مکش-های مختلف با هم مقایسه شد و نتایج نشان داد که در مکش ثابت، مقادیر فشار تورمی و تورم آزاد در محلول سدیم‌کلرید بیشتر از محلول کلسیم‌کلرید و آب مقطر است (به‌عنوان مثال، در مکش ٥٠٠ کیلوپاسکال مقدار تورم آزاد نمونه با مایع منفذی سدیم‌کلرید به‌ترتیب به مقدار ١١/٥ و ١٣/٧٪ و فشار تورمی آن به‌ترتیب به میزان ٤ و ٦/٦٪ بیشتر از نمونه با مایع منفذی کلسیم-کلرید و آب مقطر می‌باشد). هم‌چنین در نقاط نزدیک به مکش صفر، پتانسیل تورمی و فشار تورمی آب مقطر بیشتر از محلول کلسیم‌کلرید است. بنابراین نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان راهنمایی به‌منظور استفاده اقتصادی از روش‌های به‌سازی برای اصلاح خاک‌های متورم‌شونده محسوب گردد.

مراجع

1. Jones, D.E. and Jones, K.A., "Treating expansive soils", *Civil Engineering—ASCE*, Vol. 57, No. 8, pp. 62-65, (1987).
2. Puppala, A.J. and Cerato, A., "Heave distress problems in chemically-treated sulfate-laden materials", *Geo-Strata*, Vol. 10, No. 2, pp. 28-32, (2009).
3. Driscoll, R. and Crilly, M., "Subsidence damage to domestic buildings. Lessons learned and questions remaining", BRE Press, London, (2000).
4. Richards, B. G., "Footings for small and domestic structures", Linn Education and Training Services, Brisbane, Australia, (1990).
5. McManus, K. J., Lopes, D. and Osman, N. Y., "The effect of Thornthwaite Moisture Index Changes in ground movement predictions in Australian soils. To the ENZ of the Earth", *Proceedings of the 9th Australia New Zealand Conference on Geomechanics*, Centre for Continuing Education, The University of Auckland, Auckland, New Zealand, pp. 675-680, (2004).
6. Chen, Y.G., Zhu, C.M., Ye, W.M., Cui, Y.J. and Chen, B., "Effects of solution concentration and vertical stress on the swelling behavior of compacted GMZ01 bentonite", *Applied Clay Science*, Vol. (124-125), pp. 11-20, (2016).
7. Al-Yaqoub, T.H., Parol, J. and Znidarcic, D., "Experimental investigation of volume change behavior of swelling soil", *Applied Clay Science*, Vol. 137, pp. 22-29, (2017).
8. Siddiqua, S., Blatz, J. and Siemens, G., "Evaluation of the impact of pore fluid chemistry on the hydromechanical behaviour of clay–based sealing materials", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 48, No. 2, pp. 199–213, (2011).

9. Castellanos, E., Villar, M.V., Romero, E., Lloret, A. and Gens, A., "Chemical impact on the hydro-mechanical behaviour of high-density FEBEX bentonite", *Physics and Chemistry of the Earth*, *Parts A/B/C*, Vol. 33, Suppl. 1, pp. S516-S526, (2008).

10. Estabragh, A.R., Moghadas, M. and Javadi, A.A., "Effect of different types of wetting fluids on the behaviour of expansive soil during wetting and drying", *Soils and Foundations*, Vol. 53, No. 5, pp. 617-627, (2013).

11. Pusch, R., "Experimental study of the effect of high porewater salinity on the physical properties of a natural smectite clay", Technical Report No. TR01–07 (35 p.), Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, Sweden, (2001).

12. Di Maio, C., Santoli, L. and Schiavone, P., "Volume change behaviour of clays: The influence of mineral composition, pore fluid composition and stress", *Mechanics of Materials*, Vol. 36, No. (5–6), pp. 435–451, (2004).

13. Rao, S. M. and Shivananda, P., "Role of osmotic suction in swelling of salt–amended clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42, No. 1, pp. 307–315, (2005).

14. Laird, D.A., "Influence of layer charge on swelling of smectites", *Applied clay science*, Vol. 34, No. (1-4), pp. 74-87, (2006).

15. Zhang, F., Ye, W. M., Wang, Q., Chen, Y. G. and Chen, B., "An insight into the swelling pressure of GMZ01 bentonite with consideration of salt solution effects", *Engineering Geology*, Vol. 251, pp. 190–196, (2019).

16. Cui, Y.J., Nguyen, X.P., Tang, A.M. and Li, X.L., "An insight into the unloading/reloading loops on the compression curve of natural stiff clays", *Applied Clay Science*. Vol. (83-84), pp. 343-348, (2013).

17. He, Y., Ye, W.M., Chen, Y.G., Zhang, K.N. and Wu, D.Y., "Effects of NaCl solution on the swelling and shrinkage behavior of compacted bentonite under one-dimensional conditions", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 79, No.1, pp. 399–410, (2019).

18. Liang, W.Y., Yan, R.T., Xu, Y.F., Zhang, Q., Tian, H.H. and Wei, C.F., "Swelling pressure of compacted expansive soil over a wide suction range", *Applied Clay Science*, Vol. 203, pp. 106018, (2021).

19. Sun, H., Scaringi, G., Mašín, D. and Najser, J., "An experimental investigation on the swelling behavior of compacted B75 bentonite", *Engineering Geology*, Vol. 296, pp. 106452, (2022).

20. Ferber, V., Auriol, J.C., Cui, Y.J. and Magnan, J.P., "On the swelling potential of compacted high plasticity clays", *Engineering Geology*, Vol. 104, No. (3-4), pp. 200-210, (2009).

21. McKeen, R.G., "A model for predicting expansive soil behavior", *In Proceedings of the 7th International Conference on Expansive Soils*, Dallas, Tex. pp. 1–6., (1992).

22. Alonso, E.E., Romero, E., Hoffmann, C. and Carcỉa-Escudero, E., "Expansive bentonite-and mixtures in cyclic controlled-suction drying and wetting", *Engineering Geology*, Vol. 81, No. 3, pp. 213-226, (2005).

23. Nowamooz, H. and Masrouri, F., "Hydromechanical behaviour of an expansive bentonite/silt mixture in cyclic suction-controlled drying and wetting tests", *Engineering Geology*, Vol. 101, No. (3–4), pp. 154–164, (2008).

24. Eimanifar, A. and Mohebbi, F., "Urmia Lake (Northwest Iran): a brief review", *Saline Systems*, Vol. 3, No.5, pp. 1-8, (2007).

25. Soltani, A. and Estabragh, A.R., "Laboratory study of expansive soil treatment using consecutive wetting and drying cycles", *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, Vol. 4, No. 1, 49-62, (2014). (In Persian)
26. Estabragh, A.R., Javadi, A.A. and Boot, J.C., "Effect of compaction pressure on consolidation behaviour of unsaturated silty soil", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, No. 3, pp. 540-550, (2004).
27. Wheeler, S.J. and Sivakumar, V., "An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil", *Géotechnique*, Vol. 45, No. 1, pp. 35-53, (1995).
28. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H., "Soil mechanics for unsaturated soils", John Wiley & Sons, (1993).
29. Ridley, A.M., Dineen, K., Burland, J.B. and Vaughan, P.R., "Soil matrix suction: some examples of its measurement and application in geotechnical engineering", *Géotechnique*, Vol. 53, No. 2, pp. 241-253, (2003).
30. Leong, E.C., He, L. and Rahardjo, H., "Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 25, No. 3, pp. 322-333, (2002).
31. Seed, H.B. and Chan, C.K., "Structure and strength characteristics of compacted clays", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 85, No. 5, pp. 87-128, (1959).
32. Barden, L. and Sides, G.R., "Engineering behavior and structure of compacted clay", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 96, No. 4, pp. 1171-1200, (1970).
33. Barbour, S.L. and Fredlund, D.G., "Mechanisms of osmotic flow and volume change in clay soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 26, No. 4, pp. 551-562, (1989).
34. Pulat, H. F., Yukselen-Aksoy, Y. and Egeli, İ., "The effect of soil mineralogy and pore fluid chemistry on the suction and swelling behavior of soils", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 73, No. 1, pp. 37–42, (2014).
35. Delage P., Howat M.D. and Cui Y.J., "The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay", *Engineering Geology*, Vol. 50, No. (1-2), pp. 31–48, (1998).
36. Bouazza, A., Jefferis, S. and Vangpaisal, T., "Investigation of the effects and degree of calcium exchange on the Atterberg limits and swelling of geosynthetic clay liners when subjected to wet–dry cycles", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 3, No. 25, pp. 170–185, (2007).
37. Bayrak MC, "Zemin Suyu O¨ zelliklerinin Emme Basıncı U¨ zerindeki Etkileri", MSc. thesis, University of Su¨leyman Demirel, Fen Bilimleri Enstitu¨su¨, Turkey (in Turkish), (2008).
38. Pandya, S. and Sachan, A., "Matric suction, swelling and collapsible characteristics of unsaturated expansive soils", *Journal of Geotechnical and Transportation Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-9, (2018).
39. Tan, L. and Kong, L., "Study of swelling-shrinkage regularity of montmorillonite crystal and its relation with matric suction", *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, Vol. 44, No. 6, pp. 498-507, (2001).
40. Fredlund, D.G. and Xing, A., "Equations for the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 521-532, (1994).